

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

# Effet du traitement à la chaux sur la réduction de la pression de gonflement d'argiles plastiques

Kuchvichea Kan<sup>1</sup> et Bertrand François<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Technology of Cambodia, Department of Civil Engineering, Phnom Penh, Cambodge

<sup>2</sup> Université de Liège, Département ArGEnCo, Liège, Belgique

**Résumé** – Le traitement des sols argileux avec quelques pourcents de chaux permet d'améliorer leur propriétés géomécaniques. En particulier, cette technique permet de réduire significativement la pression de gonflement des sols gonflants. Cet article fournit une étude systématique des pressions de gonflement de 4 sols argileux traités à différentes teneurs en chaux et compactés à l'énergie Proctor modifiée à différentes teneurs en eau initiales. Des équations de corrélation linéaires multivariées sont ensuite proposées pour relier le logarithme de la pression de gonflement avec 4 paramètres physiques du sol (teneur en eau initiale [6–18 %], masse volumique sèche [1,62–2,01 g/cm<sup>3</sup>], teneur en chaux [0–5 %] et indice de plasticité [10,5–32,6 %] ou limite de liquidité [30,8–54,3 %]). Les résultats montrent que pour les sols testés, le traitement à la chaux permet une réduction d'un ordre de grandeur de la pression de gonflement, en moyenne. La teneur en eau initiale joue également un rôle important sur le développement des pressions de gonflement, les sols initialement les plus secs développant une pression de gonflement plus importante. La pression de gonflement est également corrélée à la plasticité du sol, exprimée en terme d'indice de plasticité ou de limite de liquidité.

**Mots clés** : gonflement / traitement à la chaux / argiles / corrélations

**Abstract** – **Effect of the lime-treatment on the reduction of swelling pressure of plastic clays.** The treatment of clayey soils with a few percent of lime improves their geomechanical properties. In particular, this technique significantly reduces the swelling pressure of expansive soils. This paper provides a systematic study of the swelling pressures of 4 clayey soils treated with different lime contents and compacted with modified proctor energy at different initial water contents. Multivariate linear correlation equations are then proposed to relate the logarithm of swelling pressure with 4 soil physical parameters (initial water content [6–18%], dry density [1,62–2,01 g/cm<sup>3</sup>], lime content [0–5%] and plasticity index [10,5–32,6%] or liquid limit [30,8–54,3%]). The results show that for the tested soils, lime treatment allows a reduction of one order of magnitude of the swelling pressure, on average. The initial water content also plays an important role in the development of swelling pressures, with the initially drier soils developing a higher swelling pressure. The swelling pressure is also correlated with the plasticity of the soil, expressed in terms of plasticity index or liquid limit.

**Keywords**: swelling / lime-treatment / clays / correlations

## 1 Introduction

Le traitement des sols avec quelques pourcents de chaux est un moyen efficace d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols fins, tel que les argiles plastiques, avec de nombreuses applications possibles dans les couches de fondation des chaussées (Selvi, 2015), les ouvrages hydrauliques (Makki-Szymkiewicz *et al.*, 2015) ou les remblais (Das *et al.*, 2021), entre autres. Les réactions pouzzolaniques entre la chaux et les aluminates et silicates présents dans l'argile créent une cimentation entre les particules qui confèrent au sol

des propriétés mécaniques améliorées telle qu'une cohésion plus élevée ou une résistance à la compression et à la traction améliorée (Bell, 1996).

En particulier, le traitement à la chaux est bien adapté pour réduire le potentiel de gonflement des argiles hautement plastiques. Ainsi, parmi d'autres études, Khattab *et al.* (2007) ont observé une diminution de 86 % (de 154 kPa à 22 kPa) de la pression de gonflement d'une bentonite compactée grâce à un traitement à la chaux (à 4 % de chaux, après 7 jours de cure). De nombreuses études ont observés des résultats similaires sur divers sols plus ou moins plastiques (Afès et Didier, 2000 ; Al Rawas *et al.*, 2005 ; Al-Mukhtar *et al.*, 2010 ; Bourokba Mrabent *et al.*, 2017 ; Nowamooz et Masrouri, 2010). Dans les résultats de Bourokba Mrabent *et al.*, 2017, cet effet de

\* Auteur de correspondance : [bertrand.francois@uliege.be](mailto:bertrand.francois@uliege.be)

**Tableau 1.** Équations de corrélation proposées dans la littérature pour prédire la pression de gonflement ( $P_g$ ) en fonction de paramètres physiques du sol ( $I_p$ : Indice de plasticité,  $LL$ : Limite de liquidité,  $w$ : teneur en eau,  $\rho_d$ : masse volumique sèche,  $\gamma_d$ : poids volumique sec).  
**Table 1.** Correlation equations proposed in the literature to predict swelling pressure ( $P_g$ ) as a function of soil physical parameters ( $I_p$ : Plasticity index,  $LL$ : Liquid limit,  $w$ : water content,  $\rho_d$ : dry bulk density,  $\gamma_d$ : dry unit weight).

Équation de corrélations	Unités	References
$\log P_g = 2,229 + 0,0276I_p - 0,0320w - 365,21\gamma_d^{-2,4616}$	$P_g$ [kPa] $I_p$ [%] $w$ [%] $\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Çimen <i>et al.</i> (2012)
$\ln P_g = 7,77 - 0,12w + 0,0054I_p$	$P_g$ [kPa] $I_p$ [%] $w$ [%]	Cantillo <i>et al.</i> (2017)
$\log P_g = -2,132 + 0,0208LL + 0,665\rho_d - 0,0269w$	$P_g$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $I_p$ [%] $w$ [%] $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Komornik et David (1969)
$\log P_g = -4,812 + 0,01405I_p + 2,394\rho_d - 0,0163w$	$P_g$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $I_p$ [%] $w$ [%] $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Erzin et Erol (2004)

réduction de la pression de gonflement est relativement immédiat et se produit dans les dix premiers jours de cure. Ensuite, les temps de cure ultérieurs ne modifient pas davantage la pression de gonflement.

La pression de gonflement de sols gonflants peut se mesurer dans une cellule œdométrique, appelée également « appareil de consolidation unidimensionnel ». Comme reporté par Nagaraj *et al.* (2009), il existe essentiellement trois méthodes principales pour déterminer la pression de gonflement dans une cellule œdométrique, à savoir :

- le test de gonflement libre : l'échantillon gonfle librement après immersion dans l'eau, puis les pressions verticales sont appliquées progressivement jusqu'à compenser la déformation de gonflement. La pression de gonflement est alors définie comme la contrainte verticale nécessaire pour annuler la déformation de gonflement libre ;
- le test de gonflement sous charge : l'échantillon gonfle librement après immersion dans l'eau, puis la pression verticale est appliquée automatiquement en une seule étape jusqu'à atteindre le volume initial ;
- le test de gonflement à volume constant : les pressions verticales sont appliquées pour contrer la pression de gonflement afin de maintenir le volume initial inchangé tout au long du processus d'immersion.

Ces trois méthodes sont reprises dans la norme ASTM D 4546. Thompson *et al.* (2006) et Kayabali et Demir (2011) ont noté que les résultats de pression de gonflement mesurés peuvent différer d'une méthode à l'autre. Dans notre étude, le test de gonflement libre sera utilisé pour mesurer les pressions de gonflement.

La pression de gonflement peut être corrélée à certaines propriétés physiques telles que la teneur en eau initiale, les limites de consistance et la masse volumique sèche, entre autres. Parmi les diverses corrélations établies, le Tableau 1 reprend les formes fonctionnelles déduites de 4 études distinctes, chacune reliant le logarithme de la pression de gonflement avec les paramètres physiques du sol par une corrélation linéaire.

Au vu du signe des coefficients de corrélation, on constate que la pression de gonflement augmente avec l'indice de plasticité ou la limite de liquidité du sol tandis qu'elle diminue avec la teneur en eau initial et la masse volumique sèche. Ainsi,

plus le sol est plastique, plus il sera susceptible de développer des pressions de gonflement importantes, dû à la présence de minéraux argileux potentiellement gonflants. D'autre part, un sol plus dense développera une pression de gonflement plus importante, dû à l'interaction accrue entre les particules d'argile lorsqu'elles sont plus rapprochées. Finalement, en partant d'une teneur en eau initiale faible, l'apport d'eau important pour resaturer le matériau induira un potentiel de gonflement plus important que pour un matériau à teneur en eau initiale élevée.

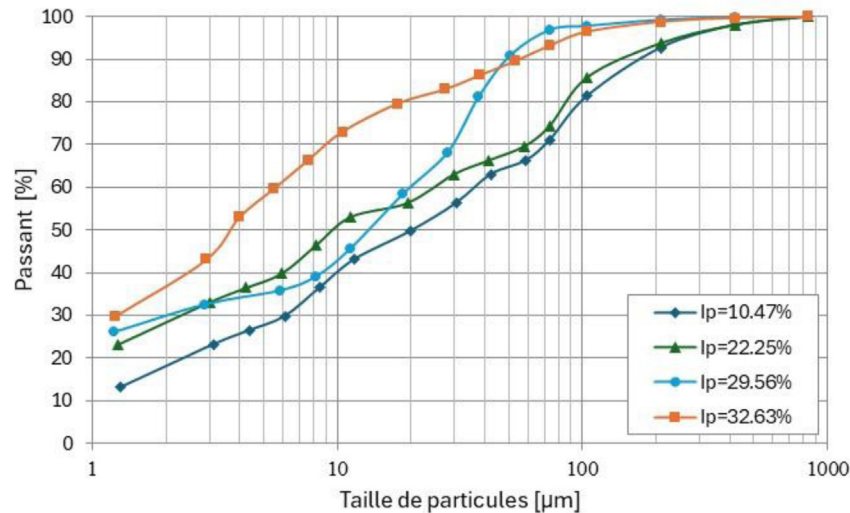
La présente étude évalue la pression de gonflement de 4 sols argileux, développant des indices de plasticité variés (de 10,46 % à 32,63 %), compacté dynamiquement à diverses teneurs en eau initiales (de 6 % à 18 %) de part et d'autre des conditions de l'Optimum Proctor et pour 4 teneurs en chaux différentes (de 0 % à 5 %), après 28 jours de temps de cure. L'objectif du travail est d'une part de mettre en évidence l'effet bénéfique d'un traitement à la chaux sur la réduction de la pression de gonflement pour des sols plastiques et d'autres parts d'établir des corrélations entre les différents paramètres physiques du sol (incluant la teneur en chaux) et la pression de gonflement. Par rapport aux nombreuses études dans le domaine, l'originalité de cette étude est la proposition de corrélations relatives à la prédiction de la pression de gonflement, associant les propriétés physiques du sol et le traitement à la chaux.

## 2 Matériaux et méthodes

### 2.1 Matériaux

Dans cette étude, 4 sols argileux sont testés avec des indices de plasticité ( $I_p$ ) assez différents. Le sol avec un  $I_p$  de 29,56 % est extrait à proximité de la carrière de Quenast en Belgique, tandis que les autres sols ( $I_p$  = 10,47 %, 22,25 % et 32,63 %) sont des argiles cambodgiennes. Leur courbe granulométrique est reprise à la Figure 1 tandis que leurs fractions granulométriques, indice de consistance, densité des grains solides et classification ASTM sont reportés dans le Tableau 2.

La chaux utilisée dans cette étude est de la chaux vice CL 90-Q (selon la norme EN 459-1) produite par le groupe Lhoist, avec 99,98 % des particules inférieures à 2 mm et 83 %



**Fig. 1.** Courbe granulométrique des 4 sols testés.

*Fig. 1. Grain size distribution for the 4 tested soils.*

**Tableau 2.** Fraction granulométrique, limite d'Atterberg, densité des grains solides et classification des 4 sols testés.

*Table 2. Grain size fraction, Atterberg limits; bulk density of solid particles, ASTM classification of the 4 tested soils.*

Sol	Fraction granulométrique (%)			Limites d'Atterberg (%)		Densité des grains solide (g/cm <sup>3</sup> )	Classification ASTM
	Sable	Limon	Argile	LL	I <sub>p</sub>		
I <sub>p</sub> = 10,47 %	28,9	52,8	18,3	30,8	10,5	2,72	CL
I <sub>p</sub> = 22,25 %	25,6	45,9	28,5	39,8	22,2	2,69	CL
I <sub>p</sub> = 29,55 %	3,2	67,2	29,6	54,3	29,5	2,69	CH
I <sub>p</sub> = 32,63 %	6,9	56,3	36,8	51,0	32,6	2,69	CH

**Tableau 3.** Teneurs en eau (OMC) et densités sèches (MDD) en conditions optimum du Proctor Modifiés, pour les 4 sols testés, pour les sol non-traités et traités à 3 % et 5 % de teneur chaux.

*Table 3. Water contents (OMC) and dry densities (MDD) under modified proctor optimum conditions, for the 4 tested soils, for untreated and lime-treated soils at 3% and 5% of lime contents.*

Sol	Non-traité		Traité à 3 % de chaux		Traité à 5 % de chaux	
	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )
I <sub>p</sub> = 10,47 %	11,8	2,01	12,3	1,96	12,6	1,91
I <sub>p</sub> = 22,25 %	11,7	1,98	11,9	1,93	12,4	1,87
I <sub>p</sub> = 29,55 %	14,5	1,86	16,8	1,80	17,0	1,78
I <sub>p</sub> = 32,63 %	14,1	1,82	14,6	1,77	15,3	1,75

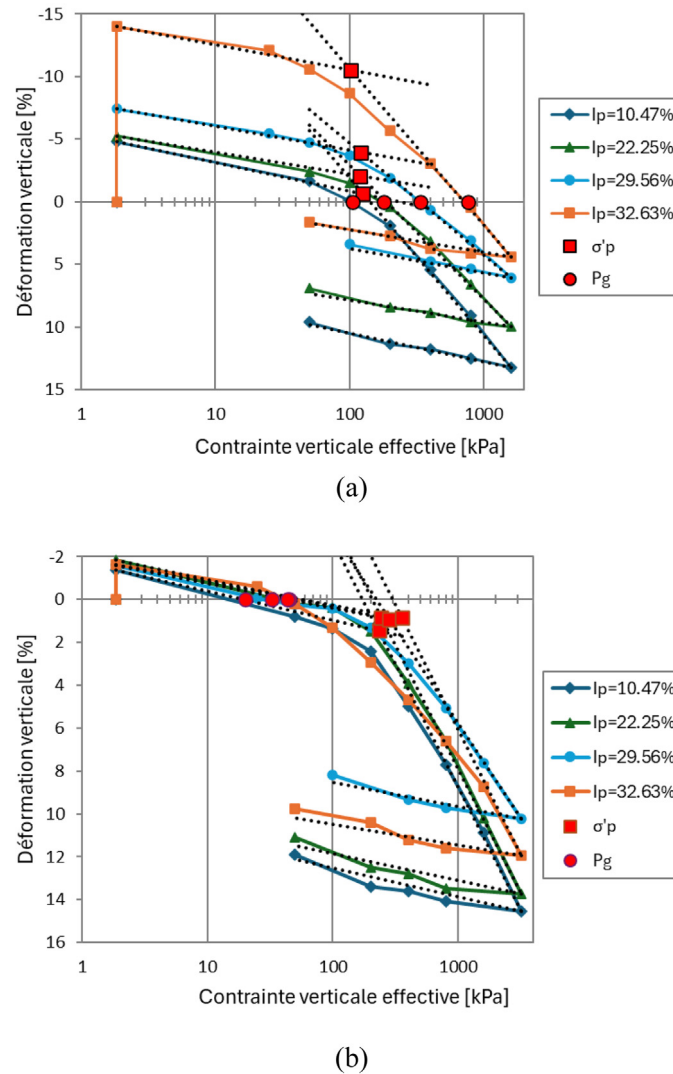
inférieures à 80 µm. Le contenu en chaux disponible est de 91,2 % et le temps de réactivité t<sub>60</sub> est de 4 à 6 minutes.

Les courbes de compactage Proctor modifié ont été établies pour les 4 sols à 3 niveaux de traitement à la chaux distincts (non-traités et traités à 3 % et 5 % de teneur en chaux). Le [Tableau 3](#) reporte les valeurs de densité sèche et de teneur en eau optimum pour ces différentes conditions. On observe que le sol avec l'indice de plasticité le plus élevé produit la densité de compactage la plus faible, dû à une proportion d'argile plus importante. De plus, la densité optimale (MDD) de ces sols diminue lorsque de la chaux a été ajoutée. Par contre, la teneur

en eau optimale (OMC) du sol augmente légèrement avec le traitement à la chaux. Cela est dû à la floculation qui réduit la densité du sol ([Negawo et al., 2019](#)).

## 2.2 Préparation des échantillons

Pour la fabrication des échantillons, les sols humides ont d'abord été séchés à une température de 60 °C (pour éviter de modifier la minéralogie des argiles), puis réduits en poudre. Le sol ainsi séché a été mélangé à de l'eau distillée pour atteindre la teneur en eau désirée. Puis ils ont été conservés pendant



**Fig. 2.** Essais de compression œdométrique sur les 4 sols en conditions saturées (après immersion durant 24 h) : (a) sol non-traité, (b) sol traité avec 3 % de chaux, à 28 jours de temps de cure.

**Fig. 2.** Oedometric compression tests on the 4 soils under saturated conditions (after immersion in water during 24 hours): (a) untreated soils, (b) treated with 3% of lime after 28 days of curing time.

24 heures dans un sac en plastique étanche, permettant d'homogénéiser la teneur en eau dans le mélange, avant d'être mélangé avec la teneur en chaux souhaitée. 1 heure après l'ajout de la chaux, les échantillons ont ensuite été fabriqués par compactage dans des moules cylindriques à une énergie de  $2700 \text{ kNm/m}^3$ , correspondant à l'énergie Proctor modifiée. Les spécimens humides compactés ont été recouverts d'un film plastique, d'une feuille d'aluminium et de paraffine. Pour les sols traités à la chaux, les échantillons ont été stockés dans une pièce à une température de  $30^\circ\text{C}$  pendant 28 jours de cure. La température de cure a été choisie à  $30^\circ\text{C}$ , pour représenter les conditions de température moyenne au Cambodge.

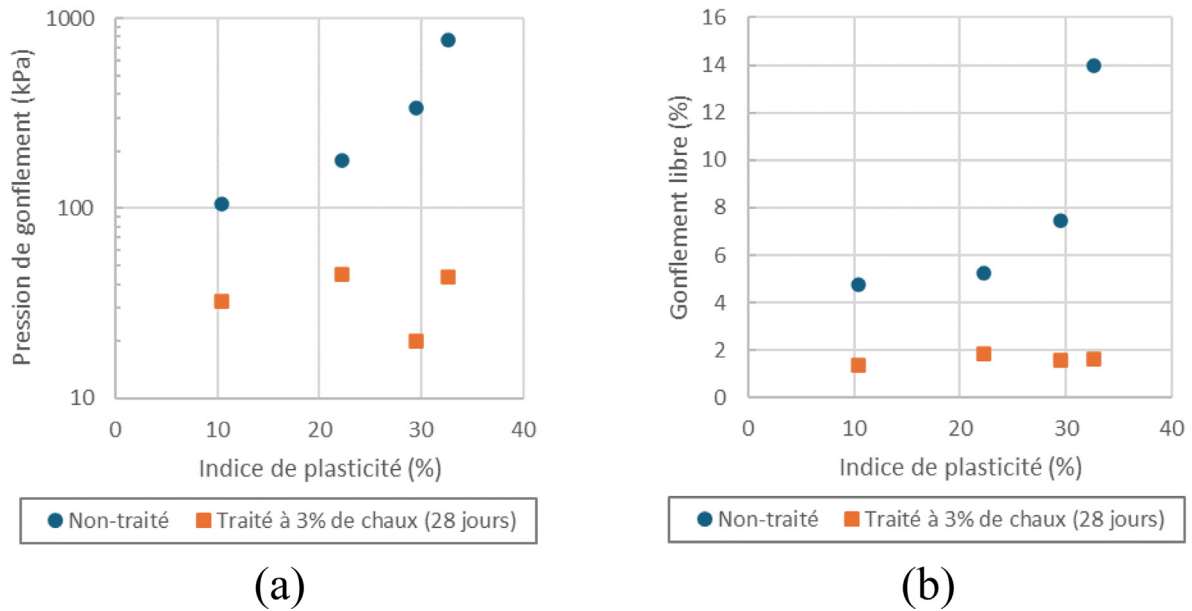
### 2.3 Compression œdométrique

Dans un premier temps, le comportement œdométrique est étudié en terme de gonflement et de compressibilité pour les 4 sols, compactés dans les conditions de l'optimum Proctor

modifié, non-traités et traités à 3 % de chaux après 28 jours de temps de cure. Les courbes œdométriques sont reportées à la Figure 2. La phase de compression ayant été réalisée en condition saturée, le gonflement libre est mesuré après que les échantillons aient été immergés durant 24 h dans la cellule œdométrique. La pression de gonflement est calculée en augmentant la pression verticale jusqu'à ce que le volume de l'échantillon soit égal au volume initial. Les indices de compression ( $C_c$ ) sont les pentes de la courbe reliant l'indice des vides au logarithme de la contrainte verticale pour les courbes de chargement au-delà de la contrainte de préconsolidation. Les indices des vides sont obtenus à partir de la masse volumique sèche initiale, la densité des grains solides et les déformations verticales en cours d'essai. De plus, la contrainte de préconsolidation ( $\sigma'_p$ ) a été calculée à partir du point d'intersection de deux lignes tangentes à la partie élastique et plastique de la courbe, comme reporté en traits pointillés sur la Figure 2.

**Tableau 4.** Propriétés géomécaniques obtenues via l'essai de compression œdométrique.**Table 4.** Geomechanical properties obtained from the oedometric compression test.

	Unité	$I_p = 10,47 \%$	$I_p = 22,25 \%$	$I_p = 29,55 \%$	$I_p = 32,63 \%$
<b>Non-traité</b>					
Pression de gonflement	kPa	105	179	339	705
Gonflement libre	%	4,8	5,3	7,4	14
Contrainte de préconsolidation	kPa	126	120	121	101
Indice de compression $C_c$	–	0,10	0,12	0,17	0,18
Indice des vides après gonflement	–	0,44	0,45	0,57	0,69
<b>Traité à 3 % de chaux, après 28 jours de cure</b>					
Pression de gonflement	kPa	32	45	45	43
Gonflement libre	%	1,4	1,8	1,6	1,6
Contrainte de préconsolidation	kPa	233	244	260	359
Indice de compression $C_c$	–	0,16	0,16	0,17	0,18
Indice des vides après gonflement	–	0,41	0,43	0,52	0,57

**Fig. 3.** (a) Pression de gonflement et (b) gonflement libre obtenu à partir des conditions optimum du Proctor modifié pour les 4 sols, exprimé en fonction de leur indice de plasticité.**Fig. 3.** (a) Swelling pressure and (b) free swelling obtained from the Modified Proctor optimum conditions for the 4 soils, expressed as a function of their plasticity index.

Le [Tableau 4](#) reprend les résultats obtenus. Pour les sols non-traités, les résultats de la pression de gonflement et du gonflement libre augmentent fortement avec les valeurs de l'indice de plasticité comme le montre la [Figure 3](#).

### 3 Pressions de gonflement

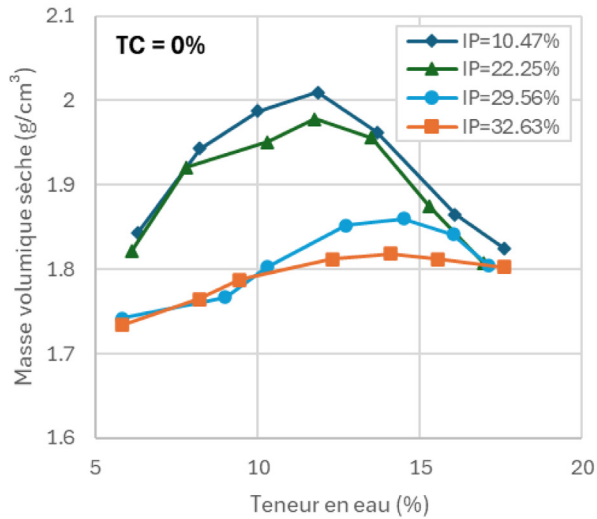
#### 3.1 Mesures expérimentales

Dans cette étude, la mesure de pression de gonflement est obtenue *via* la méthode du gonflement libre suivi d'un rechargement progressif. L'échantillon est inondé dans une cellule œdométrique en le laissant gonfler verticalement à la pression d'assise (pression de 1,8 kPa appliquée par le poids de la pierre poreuse supérieure et de la plaque de charge). Le déplacement vertical est enregistré immédiatement après

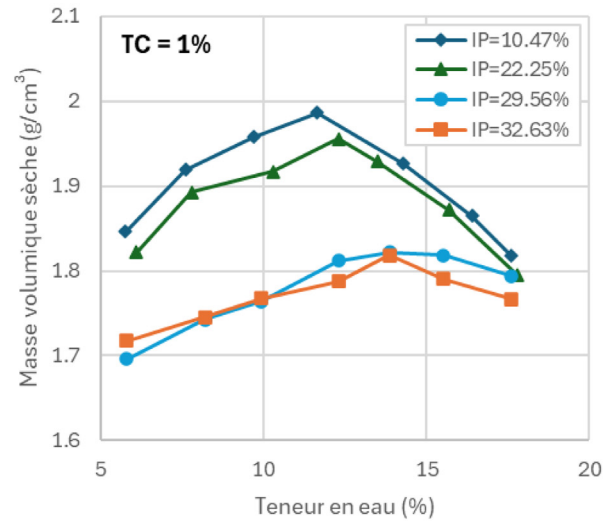
l'ajout d'eau dans la cellule, jusqu'à ce que le gonflement soit complet (lorsque la variation de la hauteur est inférieure à 2  $\mu\text{m}$  pendant 2 heures). Une fois que l'échantillon de sol cesse de gonfler, la valeur de la déformation de gonflement libre est mesurée. Ensuite, l'échantillon est chargé progressivement jusqu'à ce que sa hauteur initiale (avant gonflement) soit atteinte pour obtenir la pression de gonflement.

Afin d'étudier l'effet de la teneur en chaux et de la teneur en eau de compactage sur la pression de gonflement, 112 échantillons ont été fabriqués et testés dans cette étude, à différentes teneurs en chaux (0, 1, 3 et 5 %) et différentes teneurs en eau initiales (6, 8, 10, 12, 14, 16 et 18 %). Les échantillons ont été fabriqués comme détaillé dans la section « Préparation des échantillons » dans des moules de 60 mm de diamètre et 20 mm de hauteur. Néanmoins, comme les teneurs en eau ne correspondent pas aux teneurs en eau optimum, le

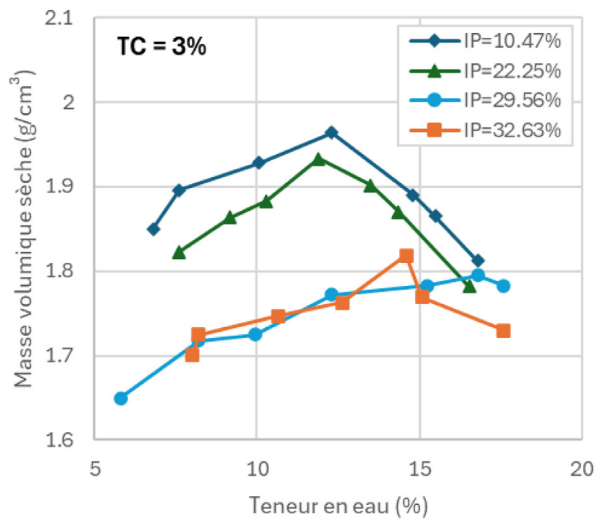




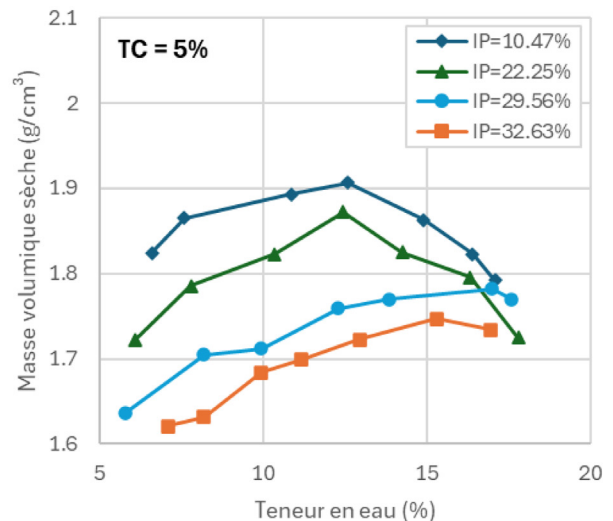
(a)



(b)



(c)



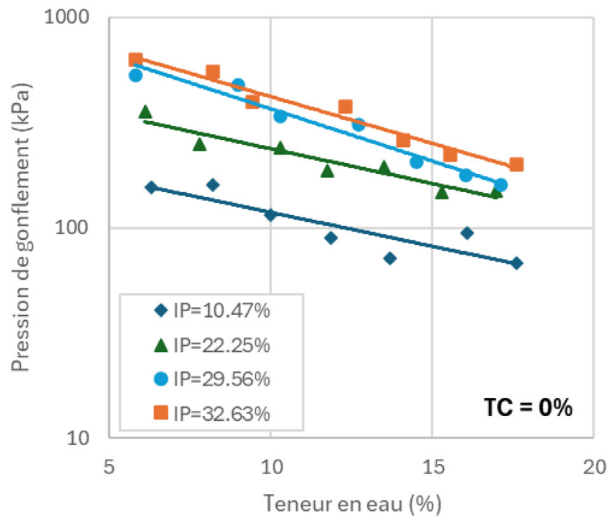
(d)

**Fig. 4.** Relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau pour un compactage à  $2700 \text{ kNm/m}^3$ . (a) Sols non-traités, Sols traités à (b) 1%, (c) 3% et (d) 5% de chaux après 28 jours de temps de cure.

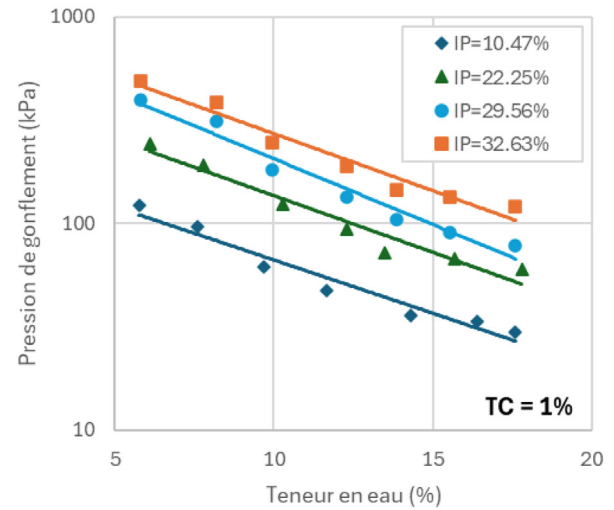
**Fig. 4.** Relationship between dry bulk density and water content for a compaction at  $2700 \text{ kNm/m}^3$ . (a) Untreated soils, Treated soils with (b) 1%, (c) 3%, (d) 5% of lime after 28 days of curing.

compactage a été effectué à une énergie de compactage constante de  $2700 \text{ kNm/m}^3$ , correspondant à l'énergie de compactage du Proctor Modifié. Ainsi, les densités sèches obtenues sont variables car elles dépendent de la compactibilité du matériau. Pour les sols traités à la chaux, les échantillons ont subi leur temps de cure à 28 jours dans un moule et recouverts d'un film plastique, d'une feuille d'aluminium et de paraffine. À 28 jours, nous observons que le volume des spécimens traités à la chaux a légèrement augmenté. Les teneurs en eau et dimensions initiales ont été remesurées.

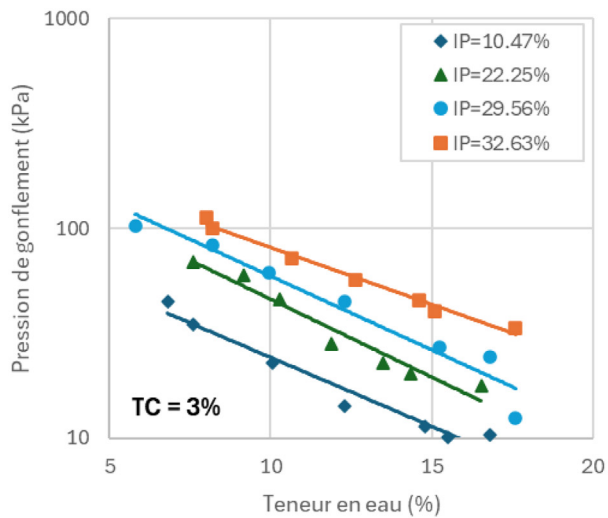
La Figure 4 reporte les densités sèches obtenues en fonction de la teneur en eau initiale, tandis que la Figure 5 reprend les pressions de gonflement mesurées pour chaque échantillon de sol en fonction de la teneur en eau initiale. On constate une diminution globalement linéaire du logarithme de la pression de gonflement lorsque la teneur en eau augmente. D'autres parts, la Figure 6 reporte ces mêmes logarithmes de la pression de gonflement ( $\log(P_g)$ ) en fonction de la teneur en chaux (TC), après 28 jours de temps de cure. On notera l'effet drastique du traitement à la chaux sur la diminution de la pression de gonflement. La dépendance entre ces 2 variables



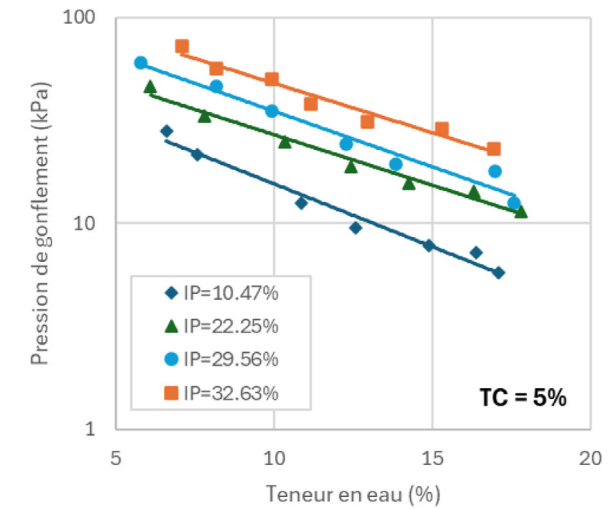
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 5.** Relation entre la pression de gonflement et la teneur en eau. (a) Sols non-traités, Sols traités à (b) 1%, (c) 3% et (d) 5% de chaux après 28 jours de temps de cure.

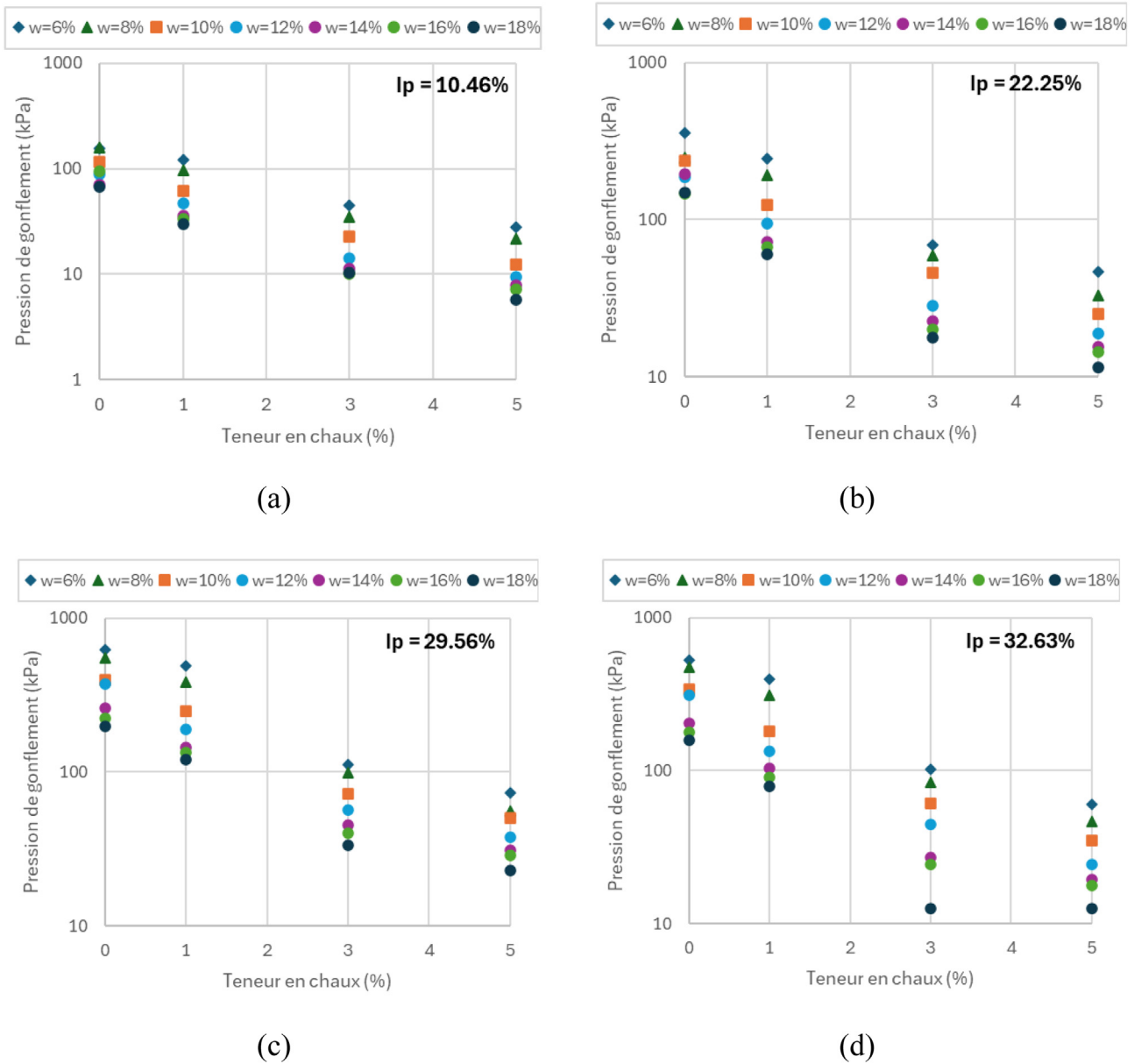
**Fig. 5.** Relationship between swelling pressure and water content. (a) Untreated soils, Treated soils with (b) 1%, (c) 3%, (d) 5% of lime after 28 days of curing.

( $\log(P_g)$  et  $TC$ ) n'est pas parfaitement linéaire puisqu'au-delà d'une teneur en chaux optimum, l'ajout additionnel de chaux apporte un effet incrémental de plus en plus faible sur le logarithme de la pression de gonflement. On ne constate néanmoins pas de teneur en chaux au-delà de laquelle la chaux additionnelle n'a plus aucun effet sur la réduction du gonflement.

### 3.2 Corrélations pour les sols non-traités

Parmi les différentes formes fonctionnelles utilisées pour développer des équations de corrélation entre la pression de gonflement et d'autres propriétés physiques des sols argileux,

les formes logarithmiques, tel que reprises dans le [Tableau 1](#) semblent donner les meilleures tendances. La [Figure 7](#) compare les prédictions des 4 équations logarithmiques du [Tableau 1](#) avec les résultats expérimentaux de pression de gonflement mesurée dans cette étude, pour le sol non-traité à la chaux. On perçoit que les 4 équations fournissent la bonne tendance, montrant ainsi que les 3 paramètres physiques utilisés dans les corrélations (teneur en eau initiale, densité sèche, limite de liquidité ou indice de plasticité) sont utilisés à bon escient. Néanmoins les coefficients multipliant ces paramètres physiques qui conditionnent l'intensité de la pression de gonflement prédite dépendent des conditions de mise en œuvre du sol et des gammes de paramètres physiques



**Fig. 6.** Relation entre la pression de gonflement et la teneur en chaux après 28 jours de temps de cure. (a)  $I_p = 10,46\%$ , (b)  $I_p = 22,25\%$ , (c)  $I_p = 29,56\%$ , (d)  $I_p = 32,63\%$ .

**Fig. 6.** Relationship between swelling pressure and lime content after 28 days of curing. (a)  $I_p = 10.46\%$ , (b)  $I_p = 22.25\%$ , (c)  $I_p = 29.56\%$ , (d)  $I_p = 32.63\%$ .

considérés. Ainsi, [Komornik et David \(1969\)](#) ont étudié des sols naturels non-remaniés, tandis que [Erzin et Erol \(2004\)](#) ont considéré des mélanges de différentes proportions de kaolinite et bentonite recompressés statiquement, ayant des indices de plasticité très élevés (entre 30 et 97 %) sortant de la gamme de l'étude actuelle. Seuls [Çimen et al. \(2012\)](#) ont étudié des sols argileux remaniés et compactés dynamiquement, comme dans cette étude, ce qui explique la bonne corrélation entre l'équation proposée par [Çimen et al. \(2012\)](#) et les pressions de gonflement obtenues dans notre étude (coefficient de corrélation linéaire  $R^2 = 0,86$ ).

Sur base des pressions de gonflement mesurées sur les 28 essais de cette étude pour les sols non-traités (4 sols et

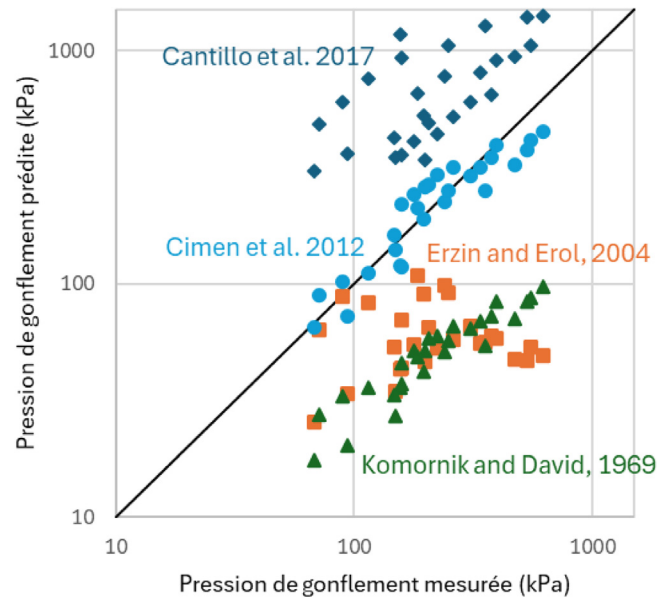
7 teneurs en eau initiales), une nouvelle corrélation linéaire reliant le logarithme de la pression de gonflement ( $\log(P_g)$ ) avec la teneur en eau initiale ( $w$  [%]), la masse volumique sèche ( $\rho_d$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]) et la limite de liquidité ( $LL$  [%]) (Éq. (1)) ou l'indice de plasticité ( $I_p$  [%]) (Éq. (2)) est proposée :

$$\log(P_g) = 2,97 + 0,0215I_p - 0,0394w - 0,366\rho_d, \quad (1)$$

$$\log(P_g) = 2,45 + 0,0197LL - 0,0398w - 0,280\rho_d. \quad (2)$$

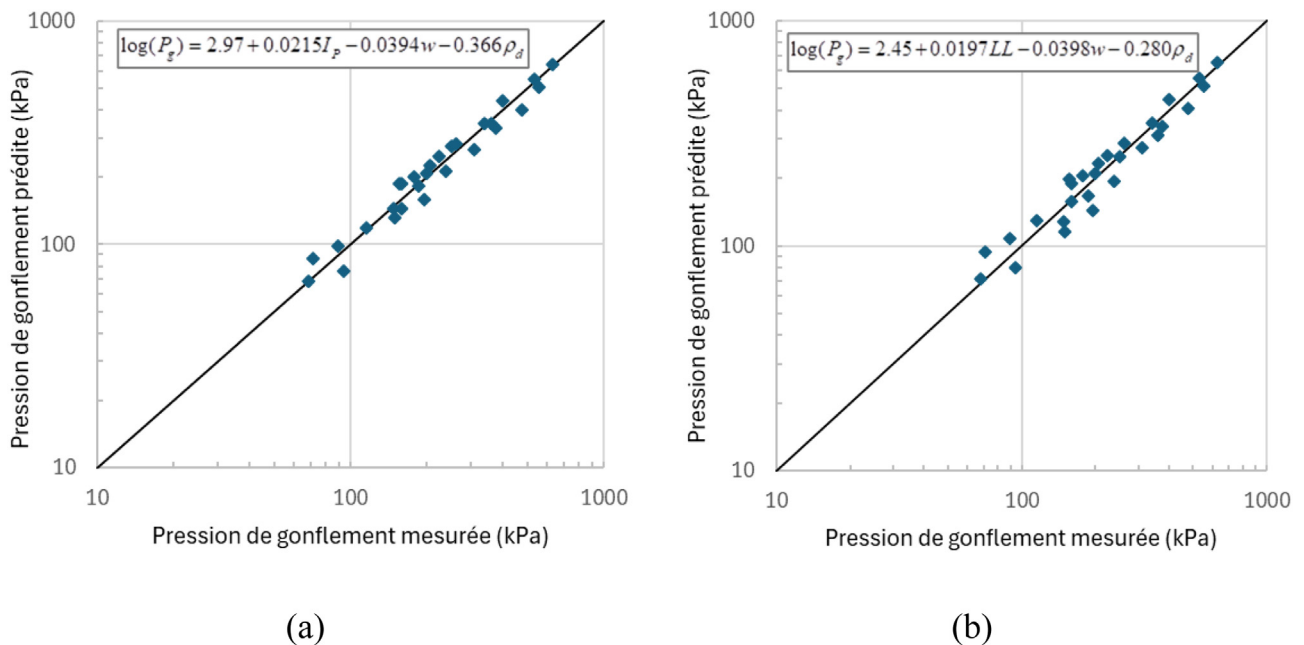
L'équation de corrélation incluant l'indice de plasticité ( $I_p$ ) donne un coefficient de corrélation multiple ( $R^2$ ) de





**Fig. 7.** Comparaison entre les pressions de gonflement prédites *via* les équations de corrélation établies par divers auteurs (voir Tab. 1) et les pressions de gonflement mesurées dans cette étude, pour les sols non-traités.

**Fig. 7.** Comparison between predicted swelling pressures according to the correlation equations established by various authors (see Table 1) and the swelling pressures measured in this study, for untreated soils.



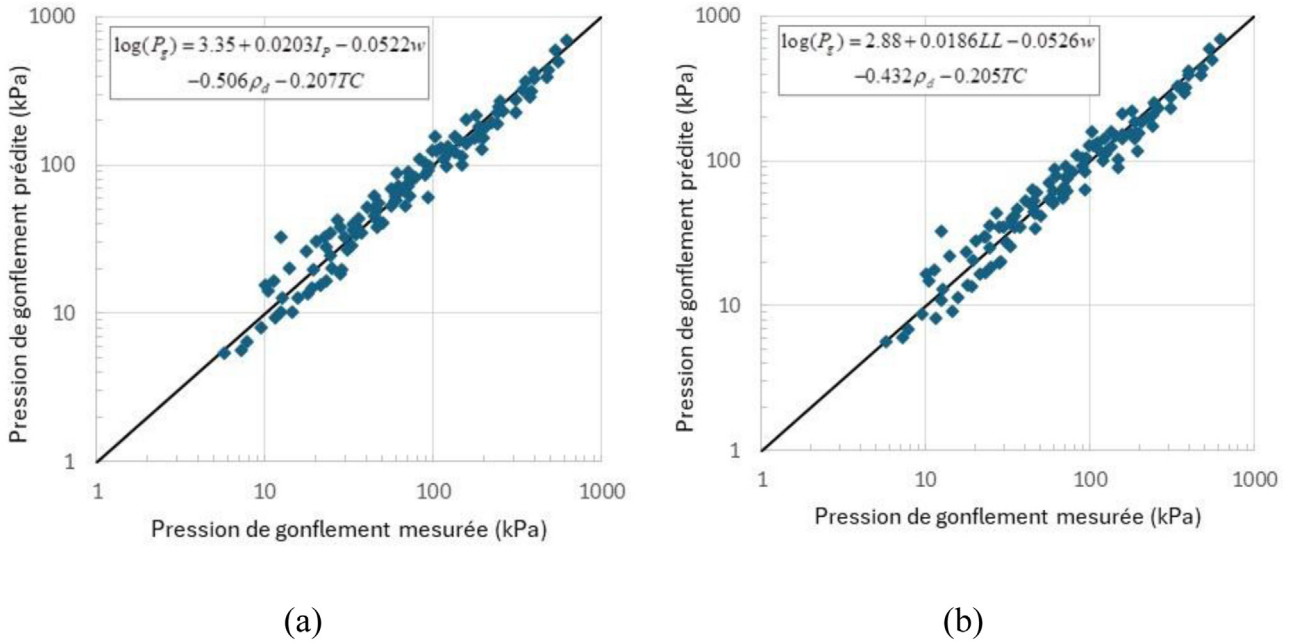
**Fig. 8.** Comparaison entre les pressions de gonflement prédites *via* les équations de corrélation établies par cette étude ((a) Éq. (1) et (b) Éq. (2)) et les pressions de gonflement mesurées, pour les sols non-traités.

**Fig. 8.** Comparison between predicted swelling pressures according to the correlation equations established in this study ((a) Eq. (1) et (b) Eq. (2)) and the swelling pressures measured in this study, for untreated soils.

0,962, légèrement supérieur à celui incluant la limite de liquidité ( $LL$ ) ( $R^2=0,936$ ). La Figure 8 compare les pressions de gonflement tel que mesurées expérimentalement avec les valeurs obtenues *via* les Équations (1) et (2).

### 3.3 Corrélations incluant l'effet du traitement à la chaux

Comme illustré à la Figure 6, le traitement à la chaux (après 28 jours de cure, dans notre cas) permet de réduire



**Fig. 9.** Comparaison entre les pressions de gonflement prédites *via* les équations de corrélation établies par cette étude ((a) Éq. (3) et (b) Éq. (4)) et les pressions de gonflement mesurées, pour l'ensemble des sols et des conditions de traitement (traités et non-traités).

**Fig. 9.** Comparison between predicted swelling pressures according to the correlation equations established in this study ((a) Eq. (3) et (b) Eq. (4)) and the swelling pressures measured in this study, for all the soils and treatment conditions (treated and untreated).

significativement la pression de gonflement. Pour les sols non-traités, les pressions de gonflement varient entre 70 kPa et 630 kPa en fonction de l'indice de plasticité, de la teneur en eau initiale et de la densité sèche, tandis que pour les sols traités avec 5 % de chaux, après 28 jours de cure, les valeurs de pression de gonflement restent inférieures à 75 kPa pour tous les sols et peuvent même atteindre des valeurs négligeables (< 10 kPa) dans les cas les plus favorables.

Ainsi, il est proposé ici d'étendre les corrélations des Équations (1) et (2) en y incluant le paramètre de teneur en chaux ( $TC$ ), en considérant une dépendance linéaire avec le logarithme de la pression de gonflement ( $\log(P_g)$ ), au même titre que la teneur en eau initiale, la masse volumique sèche et l'indice de plasticité ou la limite de liquidité. Il est à noter que la Figure 6 montre que la dépendance entre  $\log(P_g)$  et  $TC$  n'est pas exactement linéaire. Cela s'explique par le fait qu'au-delà de la teneur en chaux optimum, l'ajout additionnel de chaux induit un effet incrémentalement négligeable. En d'autres termes, le passage de 3 % à 5 % de chaux a beaucoup moins d'effet que le passage de 1 % à 3 % de chaux. Il est probable qu'une teneur en chaux élevée nécessite un temps de cure plus long pour être totalement bénéfique, puisque la consommation de la chaux dans la réaction pouzzolanique est régie par une cinétique assez lente. Néanmoins, afin de conserver une expression relativement simple de l'équation de corrélation, nous considérerons une relation linéaire entre la teneur en chaux et le logarithme de la pression de gonflement et nous ne considérons pas l'effet du temps de cure (en se limitant aux valeurs obtenues après 28 jours de cure).

Les formes fonctionnelles de ces équations sont les suivantes, pour une teneur en chaux ( $TC$  [%]) comprise entre 0 et 5 %, à 28 jours de cure :

$$\log(P_g) = 3,35 + 0,0203I_p - 0,0522w - 0,506\rho_d - 0,207TC, \quad (3)$$

$$\log(P_g) = 2,88 + 0,0186LL - 0,0526w - 0,432\rho_d - 0,205TC. \quad (4)$$

Les équations de corrélation incluant respectivement l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et la limite de liquidité ( $LL$ ) donnent sensiblement les mêmes coefficients de corrélation multiple ( $R^2 = 0,957$  et  $0,951$ , respectivement). La Figure 9 compare les pressions de gonflement telles que mesurées expérimentales avec les valeurs obtenues *via* les Équations (3) et (4).

Afin d'évaluer l'effet relatif de chaque paramètre physique sur la pression de gonflement, le Tableau 5 quantifie la variation de  $\log(P_g)$  en fonction de la gamme de variation des différents paramètres testés dans cette étude.

Le Tableau 5 démontre que l'effet de la variation de la densité sèche sur la gamme considérée est relativement négligeable sur la valeur du logarithme de la pression de gonflement ( $\Delta \log(P_g) = -0,169$ ) tandis que l'effet de la teneur en eau et du traitement à la chaux est beaucoup plus significatif ( $\Delta \log(P_g) = -0,631$  et  $-1,029$ , respectivement). Ainsi, le traitement du sol avec 5 % de chaux, après 28 jours de cure, permet de réduire, en moyenne, d'un ordre de grandeur la pression de gonflement du sol (puisque le coefficient de variation du logarithme de la pression de gonflement est de l'ordre de 1). L'effet de la teneur en eau est également important mais un peu moins significatif que le traitement à la chaux, puisqu'il réduit de 0,6 ordre de grandeur la pression de gonflement. L'indice de plasticité du sol, ou de manière

**Tableau 5.** Quantification de la variation du logarithme de la pression de gonflement en fonction de la gamme de variation des différents paramètres physiques considérés ( $w$  : teneur en eau initiale,  $\rho_d$  : masse volumique sèche,  $I_p$  : Indice de plasticité,  $LL$  : Limite de liquidité,  $TC$  : Teneur en chaux,  $V_{min}$  : Valeurs minimales,  $V_{max}$  : Valeurs maximales).

**Table 5.** Quantification of the variation of the logarithm of swelling pressure as a function of the considered range of variations of the parameters ( $w$ : initial water content,  $\rho_d$ : bulk density,  $I_p$ : Plasticity index,  $LL$ : Liquid limit,  $TC$ : Lime content,  $V_{min}$ : Minimum values,  $V_{max}$ : Maximum values).

	$w$	$\rho_d$	$I_p$	$LL$	$TC$
$V_{min}$	6 %	1,62 g/cm <sup>3</sup>	10,46 %	30,83 %	0 %
$V_{max}$	18 %	2,01 g/cm <sup>3</sup>	32,63 %	54,32 %	5 %
Coef	-0,053	-0,433	0,020	0,019	-0,206
$\Delta \log(P_g) = \text{coef} * (V_{max} - V_{min})$	-0,631	-0,169	0,450	0,438	-1,029

similaire sa limite de liquidité, joue également un rôle non négligeable sur la pression de gonflement ( $\Delta \log(P_g) = 0,450$  et 0,438, respectivement).

## 4 Conclusions

Sur base de 128 essais de pression de gonflement effectués sur 4 sols argileux présentant des indices de plasticité variés, compactés dynamiquement à différentes teneurs en eau et traités à différentes teneurs en chaux avec un temps de cure de 28 jours, cette étude a permis de mettre en évidence l'effet relatif de plusieurs paramètres physiques des sols sur la valeur de la pression de gonflement.

Les équations de corrélation obtenues ne sont évidemment valables que pour les gammes de variation des paramètres étudiés et dans les conditions propres aux tests effectués. Néanmoins, au-delà des valeurs chiffrées, ces corrélations mettent en évidence l'effet relatif de chaque paramètre sur la pression de gonflement. Ainsi, ces corrélations montrent que le traitement à la chaux jouent un rôle majeur sur les pressions de gonflement, réduisant celles-ci d'un facteur 10, en moyenne, pour un traitement avec 5 % de chaux (et d'un facteur 4 pour un contenu en chaux de 3 %), après 28 jours de temps de cure.

Cette étude a également démontré une très bonne corrélation entre l'indice de plasticité (ou la limite de liquidité) et la pression de gonflement. Finalement, la teneur en eau initiale joue également un rôle significatif sur la pression de gonflement, les sols les plus secs développant une plus grande pression de gonflement.

## Références

- Afès M, Didier G. 2000. Stabilization of expansive soils: The case of clay in the area of Mila (Algeria). *B Eng Geol Environ* 59(1): 75–83.
- Al Rawas AA, Hugo AW, Al-Sarmi H. 2005. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Build Environ* 40: 681–687.
- Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. 2010. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. *Appl Clay sci* 50(2): 191–198.
- Bell FG. 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng Geol* 42(4): 223–237.

- Bourokba Mrabent SA, Hachichi A, Souli H, Taibi S, Fleureau J-M. 2017. Effect of lime on some physical parameters of a natural expansive clay from Algeria. *Eur J Environ Civ Eng* 21(1): 108–125.
- Cantillo V, Mercado V, Pájaro C. 2017. Empirical correlations for the swelling pressure of expansive clays in the city of Barranquilla, Colombia. *Earth Sci Res J* 21(1): 45–49.
- Çimen O, Keskin SN, Yıldırım H. 2012. Prediction of swelling potential and pressure in compacted clay. *Arab J Sci Eng* 37: 1535–1546.
- Das G, Razakamanantsoa A, Herrier G, Saussaye L, Lesueur D, Deneele D. 2021. Evaluation of the long-term effect of lime treatment on a silty soil embankment after seven years of atmospheric exposure: Mechanical, physicochemical, and micro-structural studies. *Eng Geol* 281: 105986.
- Erzin Y, Erol O. 2004. Correlations for quick prediction of swell pressures. *Electron J Geotech Eng* 9: paper 0476.
- Kayabali K, Demir S. 2011. Measurement of swelling pressure: Direct method versus indirect methods. *Can Geotech J* 48(3): 354–364.
- Khattab SA, Al Mukhtar M, Fleureau J-M. 2007. Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *J Mater Civ Eng* 19: 358–366.
- Komornik A, David D. 1969. Prediction of swelling pressure of clays. *J Soil Mech Found Div* 95(1): 209–226.
- Makki-Szymkiewicz L, Hibouche A, Taibi S, Herrier G, Lesueur D, Fleureau J-M. 2015. Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment. *Eng Geol* 191: 8–22.
- Nagaraj HB, Munna MM, Sridharan A. 2009. Critical evaluation of determining swelling pressure by swell-load method and constant volume method. *Geotech Test J* 32(4): 305–314.
- Negawo WJ, Di Emidio G, Bezuijen A, Verastegui Flores RD, François B. 2019. Lime-stabilisation of high plasticity swelling clay from Ethiopia. *J Environ Civ Eng* 23(4): 504–514.
- Nowamooz H, Masroufi F. 2010. Volumetric strains due to changes in suction or stress of an expansive bentonite/silt mixture treated with lime. *Comptes Rendus Mécanique*. 338(4): 230–240.
- Selvi P. 2015. Fatigue and rutting strain analysis on lime stabilized subgrades to develop a pavement design chart. *Trans Geotech* 2: 86–98.
- Thompson RW., Perko HA., Rethamel WD. 2006. Comparison of constant volume swell pressure and oedometer load-back pressure. *Unsaturated soils* 2006: 1787–1798.